

ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2023 г. Э. Р. Бадамшина^{а,*}, Е. С. Горнев^{б,**}

^аФедеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

^бАО “Научно-исследовательский институт молекулярной электроники”, Зеленоград, Россия

*E-mail: badamsh@icp.ac.ru

**E-mail: egornev@niime.ru

Поступила в редакцию 09.08.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

Укрепление технологического суверенитета — одна из ключевых задач в достижении национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 г. В этой связи чрезвычайную актуальность приобретает разработка и налаживание производства в возможно короткие сроки отечественных материалов широкой номенклатуры, в том числе особо чистых, для нужд микроэлектронной промышленности. Авторами представлены основные проблемы и пути развития производства таких веществ и материалов. Статья подготовлена на основе доклада на заседании президиума РАН, посвящённого роли химии и наук о материалах в обеспечении технологического суверенитета России.

Ключевые слова: материалы для микроэлектроники, высокочистые материалы, интегральные схемы, фотолитография, фоторезисты, антиотражающие покрытия, суспензии, поверхностно-активные вещества, проявители

DOI: 10.31857/S086958732310002X, EDN: ECDWGX

В соответствии с перечнем поручений по итогам заседания Совета по стратегическому развитию и национальным проектам 15 декабря 2022 г. [1], утверждённым Президентом Российской Феде-

рации [2], укрепление технологического суверенитета страны становится одной из ключевых задач, её решению в 2023-м и в последующие годы необходимо уделить особое внимание при реализации мер по достижению национальных целей развития на период до 2030 г. В феврале 2023 г. Президент РФ отметил, что за короткий срок России предстоит создать или вывести на новый уровень собственные критически важные технологии в микроэлектронике, информационных технологиях, промышленности, транспорте, разработке лекарств, новых материалов, а также в других важнейших для страны секторах экономики. При этом распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 г. № 20-р в разделе 2 “Мероприятия и целевые индикаторы реализации Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации до 2030 г.” было запланировано разработать и промышленно освоить ключевые технологии и производство “материалов для литографии, в том числе фото-, электронно- и рентгенорезистов, проявителей, планаризирующих и антиотражающих покрытий; расходных технологических мате-



БАДАМШИНА Эльмира Рашатовна — доктор химических наук, заместитель директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН. ГОРНЕВ Евгений Сергеевич — член-корреспондент РАН, заместитель руководителя приоритетного технологического направления “Электронные технологии”, АО “НИИМЭ”.

риалов, в том числе кислот, растворителей, травителей...” [3].

Возможность самостоятельного развития отечественной микроэлектронной промышленности напрямую зависит от разработки (включая обязательное проведение научных исследований) и производства всего комплекса материалов, технологического оборудования и систем автоматизированного проектирования для изготовления изделий микроэлектроники с одновременным развитием соответствующих компетенций. В производстве всей номенклатуры полупроводниковых приборов и интегральных схем используется примерно 20 тыс. наименований материалов, из них критичны (от них зависят характеристики изделия) примерно 1000 наименований.

Следует подчеркнуть, что современные технологии микроэлектроники предъявляют особые требования к материалам по их чистоте:

- концентрация металлов, способных создавать в кремнии глубокие энергетические уровни, должна быть менее 10^{-9} относительно основного вещества;
- допустимый уровень загрязнений в точке подачи большинства жидкостей и газов не должен превышать миллиардных долей (ppb – 1×10^{-9}), а по некоторым материалам и триллионных долей (ppt – 1×10^{-12});
- в воздушной среде чистой комнаты должны отсутствовать молекулярные загрязнения: примеси высокомолекулярных групп C_nH_m и NH_3 , примеси летучих гидридов легирующих элементов типа RH_3 или B_2H_6 .

Получение особо чистых материалов напрямую связано со смежными направлениями, включающими разработку и аттестацию методик измерений параметров, материалов для специальной технологической тары и оснастки, производство транспортной и потребительской тары для химических материалов, прекурсоров и газов, создание соответствующей инфраструктуры.

Что касается обеспеченности материалами для микроэлектроники, в частности продуктами специальной жидкой химии (их общее количество для технологий 180–90 нм составляет 45 наименований) и специальными газами (40 наименований), то по состоянию на апрель 2023 г. проблема разработки и освоения производства 31 из 85 материалов для указанных технологий с использованием действующих механизмов финансирования (НИОКР, субсидии) в нашей стране не решается. Научно-технический задел для перспективных технологий 65–28 нм не формируется.

Какие же факторы сдерживают производство так необходимых материалов? Назовём следующие.

1. Малые объёмы потребления материалов и, как следствие, длительная окупаемость затрат или их нерентабельность. Размер требуемых капитальных вложений может превышать стоимость компаний, способных заниматься разработкой и производством продукции такого рода.

2. Отсутствие соответствующей материальной базы (инфраструктура и оборудование), недостаточная оснащённость материаловедческих предприятий технологическим и аналитическим оборудованием. Действующие механизмы поддержки материаловедения для микроэлектроники (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, НИОКР) не всегда эффективны, так как для разработки и производства современных и перспективных высокочистых материалов необходимы передовые инфраструктура, технологическое оборудование и оснастка, контрольно-измерительное и аналитическое оборудование. Большая часть материаловедческих предприятий не могут позволить себе закупать за счёт собственных средств такое оборудование.

3. Отсутствие специализированного аналитического центра контроля высокочистых материалов для микроэлектроники, в том числе для функционального тестирования и испытаний материалов.

4. Отсутствие научно-технического задела для большинства материалов. Компетенциями по разработке и производству современных материалов обладает ограниченное число организаций.

Перспективы производства особо чистых материалов для микроэлектроники нам видятся в разработке технологий очистки и доведения их качества до необходимых требований с помощью организации микротоннажных производств на базе институтов, находящихся под научно-методическим руководством РАН. Вариантом малотоннажного производства полного ассортимента материалов и транспортной тары для создаваемых производств интегральных схем, что исключит импортозависимость, может быть создание предприятий:

- по разработке и производству литографических материалов и их компонентов, по очистке, фильтрации и поставке сверхчистых кислот и травителей на их основе;
- по очистке, фильтрации и поставке органических веществ и растворителей;
- по изготовлению сверхчистых технологических газов и металлоорганических соединений;
- по созданию и производству суспензий для химико-механической планаризации;
- по производству транспортной и потребительской тары для химических материалов, прекурсоров и газов;



Рис. 1. Технологические цепочки по разработке и освоению в производстве новых технологических процессов, специализированных материалов и технологического оборудования

- по производству мишеней для напыления металлов.

В области обеспечения сырьём и материалами для микроэлектроники целесообразными представляются следующие направления работ.

1. Создание стратегического запаса материалов длительных сроков хранения. В случае, если они могут храниться в течение двух и более лет, а их разработка и освоение выпуска многократно превышают стоимость закупки для хранения в запасе, целесообразно создать обновляемые запасы (кремниевые пластины, мишени для напыления металлов).

2. Разработка и освоение производства материалов, стратегически важных для производителей микроэлектроники. Это направление требует срочной постановки комплекса НИОКР. Срок годности особо чистых веществ и материалов для микроэлектроники (фоторезисты, антиотражающие покрытия, суспензии и др.) имеет существенные ограничения и составляет, как правило, не более 6 месяцев, к тому же они требуют особых условий транспортировки и хранения, в связи с чем организация поставок по схеме параллельного импорта представляется неэффективной.

3. Формирование нового механизма организации разработки и производства сырья и материалов, для которых действующие механизмы, в том числе субсидии на НИОКР, неэффективны. Механизм должен включать в себя государственное стратегическое планирование работ и государственный заказ.

Следует отметить, что по направлению «Разработка и освоение производства материалов, стратегически важных для производителей микроэлектроники» активизировало свою деятельность Министерство промышленности и торговли РФ. Создана специальная рабочая группа по химическим материалам, в составе которой 12 секций. Их возглавляют в основном сотрудники научно-исследовательских институтов РАН, а состоят они из представителей отраслевых институтов и организаций — потребителей конкретных материалов. Работа секций заключается в анализе используемых в радио- и микроэлектронной промышленности материалов иностранного производства и их отечественных аналогов; обосновании технических требований к отечественным

аналогам, планируемым к разработке и последующему производству; в оценке прогнозируемого объёма потребления, в формировании проектов технических заданий на выполнение научно-исследовательских работ.

Далее, для развития микроэлектроники как отрасли промышленности *необходимо создавать технологические цепочки* (рис. 1) по разработке и освоению новых технологических процессов, специализированных материалов и технологического оборудования. Для этого требуются механизмы приоритетного финансирования подобных цепочек.

Примером уже сложившейся с 2019 г. цепочки взаимодействия может служить работа в области литографических материалов (фоторезисты, антиотражающие покрытия и др.). Начало такому взаимодействию положила встреча научного руководителя Института проблем химической физики РАН (ныне Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН — ФИЦ ИПХФ и МХ) академика РАН С.М. Алдошина с коллегами из АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (НИИМЭ), а также Научно-исследовательского института полупроводников и красителей (НИОПиК) во главе с членом корреспондентом РАН Б.Г. Грибовым, на которой было высказано предложение создать рабочий коллектив из представителей науки, прикладных НИИ и производителей для разработки отечественных литографических материалов. Такой коллектив сложился и в настоящее время успешно действует.

На основе взаимодействия учёных и технических специалистов вырисовался возможный путь решения проблем, касающихся налаживания производства особо чистых веществ и материалов для микроэлектроники. В большинстве случаев они требуются в небольших количествах, а срок хранения некоторых из них невелик. Этот путь — *организация для нужд предприятий микроэлектроники исследований и микротоннажного производства, реализация новых технологий особо чистых веществ и материалов на базе институтов РАН*. С этой целью предлагается создать соответствующие центры. Преимущества такого решения состоят в наличии в академических институтах РАН квалифицированных кадров, а также в том, что

научно-технический потенциал профильных институтов Академии наук, формируемая инфраструктура, технологическое и аналитическое оборудование будут использоваться для решения фундаментальных и прикладных задач по созданию материалов для технологий 65–28 нм. В качестве координационно-аналитического центра по особо чистым материалам готов выступить НИИМЭ, коллектив которого имеет богатый опыт организации такого рода взаимодействия.

Следует учитывать, что от зарубежных поставщиков материалов мы получали не только продукты, но и технологии их применения, включающие обеспечение чистоты химических реактивов без изменений их свойств по сравнению с исходным уровнем, автоматического контроля герметичности трубопроводов и соединений, создание систем автоматической доставки требуемых количеств технологических сред до точек использования, выстраивание логистики, оптимизацию производственной деятельности и т.д. В настоящее время поставки прекратились, и отечественные компании пытаются организовать собственную разработку необходимых систем. Но есть одна проблема: руководство компаний понимает (правда, не всегда в полной мере), как работает, условно говоря, производство микросхем, но как доставлять химические среды и реактивы, как этим процессом управлять, ясности нет. Привлечение к столь сложным задачам только внутреннего персонала подразделений разработчиков, скорее всего, не принесёт желаемого результата, поэтому появится запрос на услуги определённых центров высокочистых материалов.

Очевидно, что в этих случаях логичнее использовать профессиональную внешнюю команду для решения вопросов импортозамещения. Её целями должны быть инициация и координация разработки новых технологий микротоннажного производства особо чистых веществ и материалов и последующего масштабирования изготовления серийных и перспективных изделий.

Создание координационно-аналитического центра разработки технологии особо чистых веществ и материалов для микроэлектроники, в роли которого, как отмечалось выше, может выступить НИИМЭ, необходимо для организации исследований, обоснования требований к параметрам технологических сред, средствам их подготовки на основе выбранных решений; организации и координации разработок методов квалификации и управления параметрами технологических сред, а также технических решений, способствующих существенному снижению удельных расходов этих сред на выпуск одной микросхемы, повышению эффективности использования первичных ресурсов, достижению международного уровня по выбросам и влиянию на

окружающую среду, внедрению “зелёных технологий”. На повестке дня и разработка учебных программ, обучение персонала (в том числе студентов базовых кафедр) новым технологиям не только создания, но эксплуатации систем инфраструктуры микроэлектроники.

Возвращаясь к центрам проведения исследований и микротоннажного производства материалов, отметим, что пилотным проектом стало создание центра литографических материалов для микроэлектроники с инфраструктурой “чистых” помещений на базе ФИЦ ПХФ и МХ РАН. Цель — обеспечение технологического суверенитета России в этой области для существующих (180–90 нм) и новых (65–28 нм) технологий производства серийных и перспективных изделий специального и гражданского назначения.

Выбор ФИЦ ПХФ и МХ РАН обусловлен наличием развитой материально-технической базы, включая лабораторные помещения, технологические и производственные площадки, оснащённые разнообразным оборудованием — совокупный парк дорогостоящих реакторов, уникальных установок, приборов физико-механического и физико-химического анализа, в том числе полимеров и композиционных материалов, насчитывает более 250 единиц. Здесь имеются аналитический центр коллективного пользования, химико-технологический комплекс (натурные химико-технологические установки размещены на площади 1900 м²), центр коллективного пользования “Новые нефтехимические процессы, полимерные композиты и адгезивы”, высокопроизводительный вычислительный центр.

Кроме того, по конкурсам, проводившимся Минобрнауки России в 2019 и 2022 гг., созданы две молодёжные лаборатории, работающие в области материалов для микроэлектроники по предусмотренному для такого рода научных коллективов алгоритму — проведение передовых исследований и быстрее внедрение их результатов в производство. Об этом свидетельствует успешное участие молодёжных лабораторий в выполнении опытно-конструкторской работы “Разработка полимерных плёнообразующих композиций для создания фоторезистов микроэлектронного производства современного уровня”, в результате которой предложена полимерная основа антиотражающего покрытия (АОП), которое уже выпускается на мощностях ООО “Поликетон”. В таблице 1 представлены практически не отличающиеся друг от друга параметры размеров топологических элементов фоторезистивных масок, нанесённых на разработанный отечественный АОП-27 и на импортный АОП. При этом АОП-27 соответствует требованиям по чистоте, о чём свидетельствуют следующие значения содер-

Таблица 1. Линейные размеры топологических элементов фоторезистивных масок, нанесённых на разработанный АОП-27 и на импортный аналог

Размеры, нм	АОП импортный	Разработанный АОП-27
Максимальный	130.59	130.76
Минимальный	128.93	128.10
Среднее значение	129.68	129.09
Разброс	1.66	2.66

жания примесей: Al, Mg, Mn < 10 ppb; K, Cu < 15 ppb; Fe, Mo < 20 ppb; Ca, Na, Zn < 30 ppb (1 ppb = 1 мг/т).

Работы проходили в рамках технологической цепочки, о которой сказано выше (НИИМЭ, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, НИОПиК, “Поликетон” и АО “Микрон”). Успешно реализуется ещё одна опытно-конструкторская работа, в рамках которой ФИЦ ПХФ и МХ РАН должен предложить полимерную основу фоторезиста и фотогенератора кислоты. Особую гордость вызывает создание и микротоннажное производство поверхностно-активного вещества (проявитель), с которым без нареканий работает АО “Микрон”. Но впереди более масштабная задача — создание центра исследований и микротоннажного производства литографических материалов для микроэлектроники с инфраструктурой “чистых” помещений, под который уже выделен целый корпус. Для решения этой задачи остро необходим новый механизм организации работ, включая государственный заказ, формируемый на основе государственного стратегического планирования.

В дальнейшем на базе институтов РАН необходимо создать центры исследований и микротоннажного производства в области органических и неорганических соединений, специальных газов, фильтровальных материалов, полимеров.

С целью координации работ в области особо чистых материалов для микроэлектроники целесообразно сформировать при Президиуме Российской академии наук на базе Научного совета РАН по материалам и наноматериалам и Научного совета Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН “Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для её создания” объединённый совет по материалам для микроэлектроники и фотоники. Это крайне необходимо, поскольку особо чистые материалы обеспечивают развитие приоритетного направления критических и сквозных технологий “Микроэлектроника и фотоника”, служат основой всех без исключения высокотехнологичных отраслей экономики Российской Федерации,

принципы и цели развития которых определены Концепцией технологического развития на период до 2030 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-п [4].

Задачей совместной работы должно быть целеполагание, мониторинг и проведение экспертизы научных исследований и разработок по импортозамещению сверхчистых и новых материалов и веществ для микроэлектроники и фотоники, выработка рекомендаций с функциональными требованиями к отдельным классам продуктов для достижения технологической независимости в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стенограмма заседания Совета по стратегическому развитию и национальным проектам 15 декабря 2022 г. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjAIJ3M1du-AAxUoKxAlNHZuFBgwQFnoECAsQAQ&url=http%3A%2F%2Fkremlin.ru%2Fevents%2Fpresident%2Fnews%2F70086&usq=AOvVawlCR5llyemutntpezd-GGNF&opi=89978449> (дата обращения 14.08.2023).
2. Перечень поручений по итогам заседания Совета по стратегическому развитию и национальным проектам. Пр-144, п.1а-2 от 26 января 2023 г. <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/70412> (дата обращения 14.08.2023).
3. Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 г. № 20-п. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOtr-SW3duAAxUCjosKHQNbCjwQFnoECAsQAQ&url=http%3A%2F%2Fgovernment.ru%2Fdocs%2F38795%2F&usq=AOvVaw0g3L1TYt7dfA_j9r_cheMR&opi=89978449 (дата обращения 14.08.2023).
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.05.2023 № 1315-п. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (дата обращения 14.08.2023).

PROBLEMS AND WAYS TO ACHIEVE TECHNOLOGICAL INDEPENDENCE IN THE FIELD OF MATERIALS FOR MICROELECTRONICS

E. R. Badamshina^{1,#} and E. S. Gornev^{2,##}

¹*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia*

²*JSC "Research Institute of Molecular Electronics," Zelenograd, Russia*

[#]*E-mail: badamsh@icp.ac.ru*

^{##}*E-mail: egornev@niime.ru*

Strengthening technological sovereignty is one of the key tasks in the implementation of measures to achieve the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030. In this regard, the development and establishment of production of a wide range of domestic materials, including of highly pure ones, in the shortest possible time for the needs of the microelectronic industry becomes extremely urgent. The authors present the main problems and ways of developing the production of such substances and materials. The article is based on a report heard at a meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences on the role of chemistry and materials sciences in ensuring technological sovereignty of Russia.

Keywords: materials for microelectronics, high-purity materials, integrated circuits, photolithography, photoresists, antireflection coatings, suspensions, surfactants, developers.